

# 유한요소해석을 통한 내부 공간을 갖는 정혜사지 십삼층석탑의 안전진단

## Safety Examination of the Junghyesaji Thirteen-Storeyed Stone Pagoda Including Internal Spaces through the Finite Element Analysis

정재웅\*, 황보택근\*\*

경원대학교 기계자동차공학과\*, 경원대학교 소프트웨어학부\*\*

Jaeung Chung(chungae@kyungwon.ac.kr)\*, Taeg-Keun Whangbo(tkwhangbo@kyungwon.ac.kr)\*\*

### 요약

석탑들은 일반적으로 석탑 내부에 사리공과 같은 작은 내부 공간이 존재하며 이 내부 공간의 크기가 석탑문화재 보전에 영향을 줄 수 있다. 또한 석탑의 기울기 역시 석탑 보전을 위해 고려해야 할 중요한 인자이다. 본 논문에서는 자중을 받고 있는 정혜사지 십삼층석탑에 대하여 유한요소법을 이용한 전산해석을 실시하여 석탑의 최대취약부위를 조사하고 내부 공간 및 기울기 변화에 따라 최대취약부위에 어떻게 영향을 주는지 연구하였다. 그리고 탑의 파손위험성을 판단할 수 있는 변형 및 응력의 관점에서 석탑의 내부 공간 및 기울기 변화에 의한 안전진단기준이 제시되었다.

■ 중심어 : 정혜사지 십삼층석탑 | 사리공내부 공간 | 유한요소법 | 처짐량 | 응력 | 기울기 변화 | 기준 |

### Abstract

The stone pagodas include small internal spaces such as holes of Buddha's bones generally and the space's positions and sizes can make an influence on the maintenance of the stone pagoda. Also, inclined angles of the stone pagodas are an important factor to be considered to preserve them. In this paper, the Junghyesaji thirteen-storeyed stone pagoda subjected to its weight was analyzed through the finite element method to investigate the weakest location of the pagoda and study how size variation of internal spaces and slope variation influenced the weakest location. And criterions were proposed to examine the safety of the stone pagoda along the size variation of the internal spaces and the slope variation in view of the deflections and the stresses to examine fractures of the pagoda.

■ keyword : Junghyesaji Thirteen-Storeyed Stone Pagoda | Holes of Buddha's Bones | Internal Space | Finite Element Method | Deflection | Stress | Slope Variation | Criterion |

## I. 서론

불탑은 사용된 재료에 따라 목탑, 석탑, 전탑, 모전석탑, 금동, 청동, 철탑 등으로 구분이 되는데 우리나라의

경우 목탑과 석탑 등이 주로 건축되어 현재 남아 있는 불탑들은 대부분 석탑이 주를 이루고 있다[1].

석탑 문화재에 대한 안전진단을 위해 구조해석기법을 이용한 연구들이 수행되어 왔다. 구조해석을 통해

\* 본 연구는 문화관광부 및 한국문화콘텐츠진흥원의 문화콘텐츠기술 연구소 육성사업의 연구결과로 수행되었습니다.

접수번호 : #090106-005

접수일자 : 2009년 01월 06일

심사완료일 : 2009년 03월 24일

교신저자 : 정재웅, e-mail : chungae@kyungwon.ac.kr

미륵사지석탑의 붕괴원인이 지진, 벼락, 석재 내구성 저하 및 취약지반구조 측면에서 분석되었고[2][3], 불연속 다자유도계 모델을 이용하여 석탑의 진동이나 횡력에 대한 안전성평가를 위한 석탑의 동적특성에 대한 연구가 수행되었다[4].

일반적으로 석탑의 내부에는 사리를 봉안하기 위한 사리공이라는 내부 공간이 1개 이상 존재하게 되며 이러한 사리공은 석탑의 비틀림 또는 처짐의 원인이 될 수 있으며 사리공의 위치나 단면이 구조적 문제를 가질 경우 내부로부터 보이지 않는 파손의 원인이 될 수 있다. 따라서 이러한 방법으로 해체된 적이 없는 석탑의 내부 공간을 예상하여 내부 공간이 석탑에 어떠한 영향을 주는지 파악하고 보전과 보강을 위한 방안들이 정립되어야 한다.

이에, 본 논문에서는 해체된 적이 없는 정혜사지 십삼층석탑을 통해 유한요소법을 이용한 전산해석을 도입하여 석탑의 파손에 영향을 끼치는 여러 인자 중 선행 연구[5]에서 다뤘던 석탑의 자중과 기울기의 변화에 의한 영향은 물론 석탑 내부에 존재할 수 있는 임의의 공간을 석탑의 외형을 기초로 3가지의 내부 공간을 임의로 설정하여 내부 공간의 존재에 따른 최대취약부위 위치를 파악하고 내부 공간의 변화에 따라 최대취약부위의 위치가 어떻게 변화하는지를 예측하고자 한다. 또한, 여러 가지 내부 공간 및 탑 기울기 변화에 따른 탑의 처짐량 및 발생응력들에 대한 해석결과를 활용하여 변화추이를 예측할 수 있는 관계식을 도출하여 탑의 안전진단지표로 활용할 수 있도록 하고자 한다.

## II. 석재 건축 문화재의 안전진단

### 1. 석재 건축 문화재의 특성

#### 1.1 석재의 특성

석조문화재에 사용된 화강암은 사용된 위치와 시간에 따라 물리적 특성들이 달라지는 경향이 있기 때문에 정확한 석탑의 안전진단을 수행하기 위해서는 비파괴 검사, 시편 채취를 이용한 실험과 같은 방법으로 재질의 물성치가 정확히 측정되어야 한다[6][7]. 하지만,

본 논문에서는 문화재 특성상 정확한 시험이나 실험을 거치지 못했기 때문에 기존에 측정이 실시되었던 석탑인 공주 천진보탑의 물리적 특성(밀도= $2.472 \times 10^{-5} N/mm^3$ , 영률  $E = 13047.3 N/mm^2$ , 프와송비 = 0.25)을 적용하여 진단을 실시했다[8].

### 1.2 정혜사지 십삼층석탑의 특성

정혜사지 십삼층석탑([그림 1] 참조)은 1962년 국보 제 40호로 지정되었으며, 경북 경주시에 위치한 불탑으로 통일신라시대 9세기 즈음에 건축된 높이 5.9m, 기단 너비 2.1m의 불탑이다[9]. 탑은 보기 드문 13층이며 초층에 비해 2층 이상이 일반적인 체감의 비례를 무시하고 줄어드는 점 등, 특수한 형태를 가졌을 뿐만 아니라 초층 옥신 4면의 감형(龕形) 개설과 아울러 기단도 통식에서 벗어난 특수 형태로 축조되었다[10].



그림 1. 정혜사지 십삼층석탑

### 2. 석재 건축 문화재의 유한 요소 해석

본 논문에서는 유한요소법(F.E.M: Finite Element Method)을 이용한 유한 요소 해석을 통해 건조물 문화재의 구조와 안전 상태를 진단하였다. 이를 위해 유한요소모델링과 해석 후 결과를 정확하게 분석하기 위하여 알테어 회사의 Hypermesh 소프트웨어를 사용했으며, 유한요소해석을 위한 Solver로는 범용 유한요소 해석 프로그램인 Abaqus 소프트웨어를 사용했다.

### 2.1 측정 데이터의 문제점

정확한 유한요소모델링을 하기 위해 문화재 관련 전문 기업의 측정 데이터를 사용하였지만, 3차원 스캔 데이터를 Hypermesh 프로그램으로 불러들일 때, 선형연구와 마찬가지로 모델링에 사용할 수 없을 만큼 문제점이 많이 발견되었다. 문제점들을 종류에 따라 구분해보면 데이터의 축적 불일치, 메쉬의 중복, 불량, 부재 등이 동일하게 발생하였고, 3차원 스캔 데이터를 기초로 전체적인 모델링의 수정을 진행하였다[5][11].

### 2.2 유한요소법(F.E.M.) 해석 순서

- 석탑 구조 안전 진단을 위한 유한요소해석은
- ① 석탑의 외형적 비틀림, 부재별 무게 중심의 측정을 통해 석탑의 기울어짐 측정
  - ② 화강암의 자중을 고려한 유한요소해석
  - ③ 석탑에 기울기와 내부 공간에 변화를 주어 위 과정을 반복 실행
  - ④ 결과분석

의 순서로 해석을 진행한다. 화강암의 자중을 고려한 유한요소해석에서는 석탑 자중에 의한 처짐량과 최대 발생응력에 대한 해석을 실시하며, 석탑 내부 공간 변화에 따라 해석 결과를 비교, 분석한다.

## 3. 유한요소해석

### 3.1 모델링

정혜사지 십삼층석탑은 상하층 기단과 각 층별로 구분하여 15개의 부재로 나누고, 석탑의 안전진단을 위해 사용된 유한요소모델의 경우, 모든 부재가 연결되어 있는 모델로써, 실제 석탑과는 각 부재의 연결 상태가 다르다. 정혜사지 십삼층석탑은 체계적인 관리가 시작된 이후로 해체 된 적이 없는 석탑이기 때문에 석탑 내부에 관한 정보나 사용된 각 부재들의 두께나 석탑의 축조 방식에 관한 자료가 존재 하지 않으며 외형적인 모습과 문양 그리고 육안으로 확인할 수 있는 자료만 존재한다. 문화재청에는 정혜사지 십삼층석탑에 대해 “1층 탑신은 네 귀에 방형의 석주를 우주로 세우고, 우주안으로 역시 1석씩으로 된 석주와 인방과 하방을 걸쳤다. 2층 이상의 탑신은 옥신·옥개석이 각기 1석씩으로

로 구성되어 있다.”라고 기재되어 있다[9].

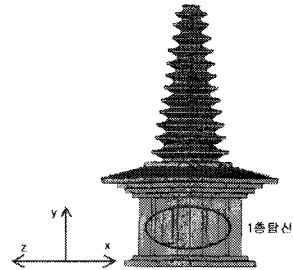


그림 2. 내부 공간 예상 지점

이를 기초로 유추해보면 2층 이상 탑신은 각 부재가 1개의 석재로 되어있기 때문에 내부 공간이 존재하지 않을 확률이 크며 일반적인 석탑의 사리공이 1층 탑신에 존재하듯이 이 석탑의 경우에도 [그림 2]처럼 1층 탑신에 내부 공간이 존재할 확률이 높다.

표 1. 내부 공간의 크기

항목	크기(X*Z*Y)(cm)
내부 공간 #1	21*21*17
내부 공간 #2	50*50*50
내부 공간 #3	65*65*150

정혜사지 석탑의 외형의 특징을 기초로 3가지의 내부 공간을 설정하여 [표 1][그림 3]과 같이 모델링 하였다[10]. 내부 공간 #1은 석탑 외부에 실제 존재하는 외부 공간을 모델링의 근거로 정했다. 1층 탑신의 4면 중 1면에만 존재하며 이 공간이 사리공일 수도 있다는 견해를 보이는 학자도 있다. #1의 공간은 이 공간의 크기와 위치한 높이를 그대로 석탑 내부에 모델링 하였다.

내부 공간 #3은 크기가 큰 우주 옆에 세워진 소주의 크기를 기초로 모델링하였으며 내부 공간 #2는 #1과 #3의 중간에서 적당한 크기를 설정하였다.

경계조건 설정의 경우, 지지지반을 변형이 생기지 않는 강체로 가정하여 지면과 접촉하는 기단의 바닥면은 상하로의 움직임(Y축 방향)이 없도록 고정하고, 나머지 방향들(X, Z축 방향)에서는 고정하지 않고 자유롭게 움

직이도록 설정하였다. 또한, 탑의 자중을 하중으로 설정하였다[12].

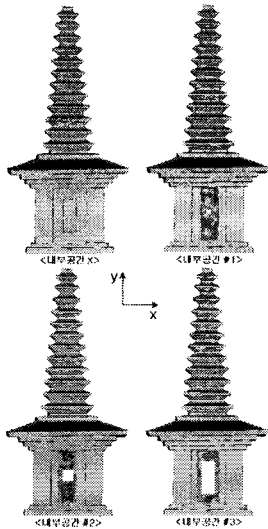


그림 3. 내부 공간 모델링

본 연구에서는 석탑의 안전진단을 위해 모두 4가지의 경우, 즉 현 상태의 탑과 현 상태보다 각각 1°, 3°, 5°가 더 기울어진 경우에 대한 탑의 자중에 대한 안전진단을 유한요소해석을 이용하여 수행하였다.

### 3.2 외형과 무게중심에 의한 비틀림 측정

석탑의 외형은 육안으로는 옥개석과 탑신 중 가장 큰 1층의 옥개석과 탑신, 그리고 기단부가 다른 층의 옥개석과 탑신과 서로 조금씩 틀어져 있는 것을 확인할 수 있으나 하단부에 위치한 기단과 1층 탑신, 옥개석의 크기가 다른 부분에 비해 매우 크고 상하로의 뒤 틀림은 보이지 않기 때문에 큰 문제는 없다고 판단된다.

현재 정혜사지 십삼층석탑은 기단 바닥면과 노반부의 윗면을 기준으로 하면 약 0.49° 기울어져 있는 상태이며, 앞으로의 기울기에 따른 유한요소해석은 현 상태보다 각각 1°, 3°, 5°의 기울기를 더 주었기 때문에 실제 기울어진 각도는 현 상태(0.49°), 1.49°, 3.49°, 5.49°인 석탑에 대한 해석이 될 것이다.

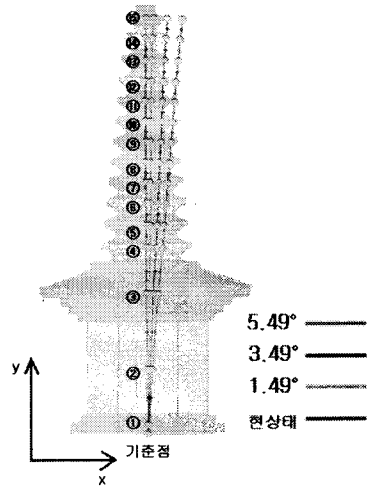


그림 4. 기울기에 따른 각 부재의 무게 중심점의 비틀림

[그림 4]는 석탑 각 부재의 무게 중심을 하층기단에 서부터 차례로 번호를 부여 후 측면(XY 평면)에서 보았을 때의 모습이다.

표 2. 기울기에 따른 기단과 각 부재의 무게 중심점의 비틀림 각

기울기 부재 No.	현 상태	1.49°	3.49°	5.49°
①	3.95	4.26	5.05	6.35
②	0.57	0.64	0.89	1.1
③	0.79	0.77	0.83	0.77
④	0.67	0.64	0.65	0.6
⑤	0.74	0.71	0.72	0.67
⑥	0.78	0.75	0.75	0.7
⑦	0.91	0.88	0.88	0.82
⑧	0.87	0.83	0.83	0.77
⑨	0.84	0.8	0.79	0.72
⑩	0.92	0.89	0.87	0.81
⑪	0.88	0.84	0.83	0.76
⑫	0.87	0.83	0.82	0.75
⑬	0.84	0.8	0.79	0.72
⑭	0.74	0.7	0.68	0.61
⑮	0.64	0.6	0.58	0.51

하층 기단부의 바닥면을 기준으로 각 부재의 무게 중심점과 비교를 해보면([표 2] 참고) 기울기에 따라 1번 부재가 3.95°~6.35°로 가장 많이 틀어져 있었고, 15번 부재가 0.51°~0.64°로 가장 적게 틀어져 있는 것을 알

수 있다. 1번 부재가 다른 부재들에 비해 무게중심의 비틀린 정도가 큰 것을 알 수 있지만 1번 부재는 기단으로서 가장 하단에 위치하며 단면이 넓고 다른 부재들에 비해 길이가 짧기 때문에 석탑의 안전에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 비틀림 측정에 있어서 내부 공간은 외형적인 측면에서 보았을 경우 영향을 주지 않을 것이라 판단하였고, 무게중심 측면에서 보았을 때 또한 내부 공간이 상대적으로 바닥면에 가깝고 거대한 1층 탑신에 위치하고 있기 때문에 마찬가지로 큰 영향을 주지 않을 것이라 판단하여 제외하였다.

3.3 내부 공간 변화에 따른 자중 및 기울기를 고려한 구조해석

[그림 3]과 같은 4가지 경우의 내부 공간을 가진 석탑에 대하여 0.49° 기울어져 있는 현 상태의 석탑과 기울어진 정도에 따른 석탑의 안전성 평가를 위해 현 상태의 탑보다 각각 1°, 3°, 5°의 기울기를 더 주었을 경우 즉, 각각 1.49°, 3.49°, 5.49° 기울어진 탑에 석탑 하중의 영향을 고려한 유한요소해석이 수행되었다. 또한, 유한요소해석에서 하중으로 주어진 석탑의 무게는 약 191430kgf(1.876 × 10<sup>6</sup>N) 이고, 부피는 75.91m<sup>3</sup>이다.

[표 3]을 보면 각각의 내부 공간에서 기울기에 따라 자중에 의한 최대처짐량과 최대발생응력을 알 수 있다.

표 3. 최대처짐량 및 최대발생응력

변위(내부 공간)	기울기				
	현 상태	1.49°	3.49°	5.49°	
최대처짐량 (mm)	X	0.0918	0.0957	0.112	0.134
	#1	0.0921	0.0961	0.112	0.135
	#2	0.0925	0.0965	0.112	0.135
	#3	0.0935	0.0975	0.113	0.136
최대발생응력 (MPa)	X	0.136	0.149	0.178	0.210
	#1	0.136	0.149	0.178	0.210
	#2	0.136	0.149	0.178	0.210
	#3	0.135	0.149	0.178	0.210

기단하단부의 움직임은 고정했기 때문에 최소처짐량은 0이며, 발생응력의 최소값 또한 0에 가까운 값이기 때문에 0이라고 볼 수 있다. [표 3]과 [그림 5]에서 보이

는 바와 같이, 내부 공간 및 기울기가 커질수록 최대처짐량 및 처짐량 분포는 커지는 경향을 나타내고, 최대처짐량 및 처짐량 분포는 내부 공간의 영향([표 3]과 [그림 5]의 <2>, <3> 참조)보다는 기울기의 변화에 영향([표 3]과 [그림 5]의 <1>, <2> 참조)을 받는 것을 알 수 있다.

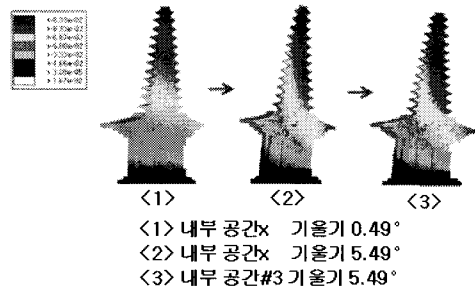


그림 5. 내부 공간 및 기울기에 따른 처짐량 분포 변화

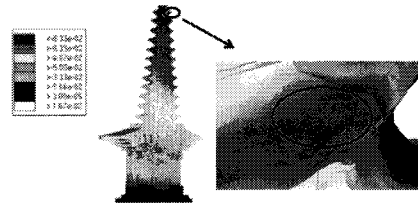


그림 6. 최대처짐량 발생부위

그리고 최대처짐량은 내부 공간 및 기울기 변화에 상관없이 동일한 노반부의 처짐이 생기는 부위에서 발생한다([그림 6] 참조). [표 3]에 보이는 바와 같이, 최대발생응력의 경우, 기울기의 변화에 영향을 받지만 내부 공간의 변화에는 영향을 거의 받지 않는다.

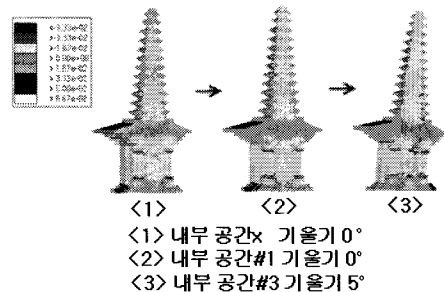


그림 7. 내부 공간 및 기울기에 따른 최대발생응력 분포 변화

이것은 최대응력이 내부공간이 있는 1층 탑신보다

상층인 3층 탑신의 균열 부분에서 발생하고 내부 공간의 변화의 위치가 최대응력이 발생하는 부위에 영향을 주기에는 멀리 떨어져있기 때문인 것으로 볼 수 있다. 또한, [그림 7]에서 보는 바와 같이, 내부 공간이 커질수록 내부 공간 주변의 발생응력 분포가 커지는 것을 알 수 있다.

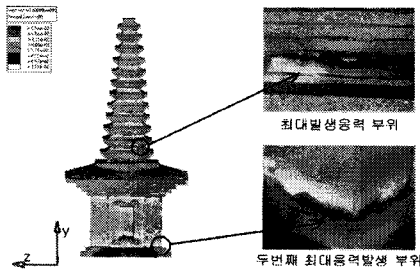


그림 8. 최대발생응력 발생부위

그리고 기울기와 내부 공간이 커질수록 처짐이 생기는 방향의 옥개석과 탑신의 경계면의 응력이 증가하는 것을 알 수 있으며 1층 탑신과 기단의 접촉면은 3층 기단의 균열 부위를 제외하면 가장 큰 응력들이 분포한다([그림 8] 참조).

표 4. 내부 공간 및 기울기 변화에 따른 최대처짐량과 최대발생응력의 증가율(%)

변위(내부 공간)	기울기				
	현상태	1.49°	3.49°	5.49°	
최대 처짐량 (mm)	X	0	4.248	22.004	45.97
	#1	0.327	4.684	22.004	47.059
	#2	0.763	5.12	22.004	47.059
	#3	1.852	6.209	23.094	48.148
최대 발생응력 (MPa)	X	0	17.084	52.086	91.802
	#1	2.602	18.36	53.068	92.784
	#2	3.191	18.851	53.412	92.98
	#3	6.775	22.877	58.37	99.018

[표 4]는 정혜사지 심삼층석탑이 내부 공간이 없을 경우 현 상태 기울기 대비 내부 공간과 기울기 변화에 따른 최대처짐량과 최대발생응력의 증가율을 나타낸 것이다.

최대처짐량 측면에서 보면 내부 공간#3을 가지고 최대 기울어진(5.49°) 탑의 경우가 내부 공간이 전혀 없고 현 상태 기울기를 가진 탑 보다 처짐량이 약 48%

증가하며 가장 큰 증가율을 나타냈다.

최대발생응력의 경우에는 내부 공간#3을 가지고 최대 기울어진(5.49°) 탑의 경우가 내부 공간이 전혀 없고 현 상태 기울기를 가진 탑 보다 최대응력이 99% 증가하며 가장 큰 증가율을 보였다.

내부 공간 변화에 대해 기울기 증가에 따른 각 항목별 증가율을 비교하여 추세선을 나타내면 [그림 9]와 같다[5]. [그림 9]에 보이는 바와 같이, 최대처짐량과 최대발생응력은 내부 공간의 변화보다는 기울기 변화에 훨씬 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

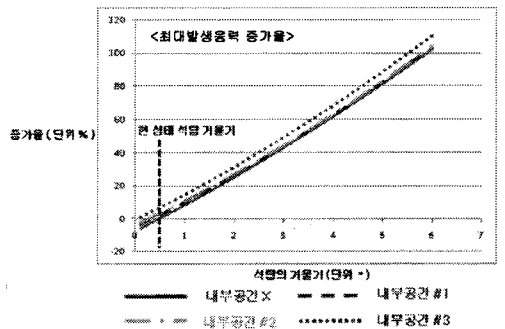
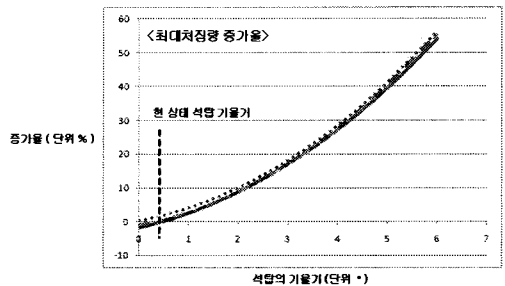


그림 9. 내부 공간에 따른 기울기 변화에 대한 최대처짐량 및 최대발생응력 증가율 비교

[그림 9]의 첫 번째 그래프에서 정혜사지 심삼층석탑의 내부 공간의 기울기에 대한 최대처짐량 증가율의 방정식은 다음과 같다.

$$y_1 = 0.996x_1^2 + 3.339x_1 - 1.875 \quad (1)$$

$$y_2 = 1.108x_1^2 + 2.826x_1 - 1.324 \quad (2)$$

$$y_3 = 1.119x_1^2 + 2.614x_1 - 0.786 \quad (3)$$

$$y_4 = 1.119x_1^2 + 2.615x_1 + 0.302 \quad (4)$$

방정식 (1)-(4)에서  $x_1$ 은 석탑의 기울기(°),  $y_1$ 은 내부 공간이 존재하지 않는 경우(내부 공간X)의 최대 처짐량 증가율(%),  $y_2, y_3, y_4$ 는 각각 내부 공간#1, #2, #3의 최대처짐량 증가율(%)을 나타낸다.

[그림 9]의 두번째 그래프는 내부 공간과 기울기 변화에 따른 현 상태 대비 최대발생응력 증가율의 추세선 그래프이다. 이 그래프를 다음과 같은 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$y_5 = 0.46x_1^2 + 15.548x_1 - 7.729 \quad (5)$$

$$y_6 = 0.599x_1^2 + 14.441x_1 - 4.618 \quad (6)$$

$$y_7 = 0.628x_1^2 + 14.23x_1 - 3.932 \quad (7)$$

$$y_8 = 0.617x_1^2 + 14.747x_1 - 0.597 \quad (8)$$

방정식 (5)-(8)에서  $x_1$ 은 석탑의 기울기(°),  $y_5$ 은 내부 공간이 존재하지 않는 경우(내부 공간X)의 최대 발생응력의 증가율(%),  $y_6, y_7, y_8$ 는 각각 내부 공간 #1, #2, #3의 최대발생응력의 증가율(%)을 의미한다.

위의 방정식들을 이용하여 내부 공간의 유무에 따른 정혜사지 십삼층석탑의 기울어진 상태에 따른 현 상태 대비 최대처짐량 및 최대발생응력측면에서 몇 % 악화되었는지 예측할 수 있다.

### III. 결론

본 논문에서는 정혜사지 십삼층석탑에 대한 안전진단을 위해 유한요소법을 이용한 전산해석을 수행하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 최대처짐량 및 최대응력측면에서 탑의 안전진단을 수행할 경우에 고려해야할 중요한 인자는 내부 공간보다는 기울기이다. 왜냐하면 자중을 받는 탑에서 발생하는 최대처짐량 및 최대응력은 탑 기울기 변화에는 크게 영향을 받지만 내부 공간 변화에는 거의 영향을 거의 받지 않기 때문이다. 또한, 유한요소모델 형성 시간이 더 걸리는 내부 공간을 포함하는 유한요소모델

을 만들 필요 없이 내부 공간이 없는 유한요소모델을 이용하여 탑의 안전진단해석을 수행할 경우, 보다 짧은 해석 시간 내에 해석결과를 도출할 수 있다.

둘째, 내부 공간 및 기울기 변화에 상관없이 석탑의 최대처짐량 측면에서 가장 취약한 부위는 노반부에서 처짐이 생기는 부분이고, 최대발생응력 측면에서 가장 취약한 부위는 3층 탑신의 균열부위이다. 탑의 안전진단 및 유지보수를 위해 우선적으로 검토하고 조사해야 할 부위가 바로 앞에서 언급한 두 부위들이다.

셋째, 현 상태 대비 최대처짐량 및 최대발생응력의 증가율을 예측할 수 있는 관계식들을 얻을 수 있었다. 이러한 관계식들을 이용하여 내부 공간 및 기울기에 따른 최대처짐량과 최대발생응력 측면에서 현 상태 대비 탑의 악화율을 예측할 수 있다.

본 논문에서는 탑의 내부 공간 및 기울기 변화에 따른 처짐량 및 내부발생응력의 변화를 고찰하였다. 비록 탑이 위치해 있는 지반을 강체로 가정하고 탑을 구성하는 모든 부재가 연결되어진 상태로 결과를 도출하였지만, 탑의 안전진단을 위해 탑의 처짐량 및 발생응력측면에서의 파손위험도를 예측하고자 할 경우에 해석결과들로부터 도출된 방정식들을 적용한다면 탑의 안전진단지표로 유용하게 쓰일 수 있다.

본 논문에서는 지지지반을 변형이 발생하지 않는 강체로 가정하여 해석하였다. 하지만, 지반 아래로 지하수가 흐를 때 지반의 무너짐이나 탑 자중에 의해 지반이 기울어지는 경우에 대한 탑의 안전성을 검토하기 위해서는 석탑을 지지하고 있는 지반을 탄성지반의 형태로 모델링하여 해석할 필요가 있다.

### 참고 문헌

- [1] <http://www.sculpture.co.kr/daesung/culture/budston/pagoda/index.html>
- [2] 홍석일, 김호수, 정성진, 김옥규, 김덕문, 송하영, “구조해석을 통한 미륵사지 석탑의 붕괴원인 연구”, 대한건축학회논문집, 제22권, 제5호, pp.89-96, 2006.

- [3] 홍석일, 김호수, “개별요소법을 이용한 조적식 석탑의 구조해석”, 대한건축학회논문집, 제23권, 제2호, pp.43-50, 2007.
- [4] 이성민, 손호웅, 이수근, “석탑문화재의 강성과 고유진동수에 관한 연구”, 한국구조물진단학회 논문집, 제8권, 제3호, pp.263-270, 2004.
- [5] 김관호, 정재웅, “유한요소법을 이용한 진전사지 삼층석탑의 전산해석”, 한국콘텐츠학회논문지, 제8권, 제6호, pp.213-221, 2008.
- [6] 서만천, 석조문화재의 비파괴진단분석을 통한 보존기술연구, 과학기술부, p.12, 2005.
- [7] 불국사 다보탑(정밀안전진단보고서), (주)고려구조ENG, pp.100-134, 2001.
- [8] 최석원, 충남지역 석조문화재의 현황과 보존대책, 과학기술부, pp.72-73, 2001.
- [9] <http://www.encyber.com/index.html>
- [10] <http://www.cha.go.kr/index.html>
- [11] 3I 실현과 고증을 기반으로 한 건조물 문화재에 관한 연구, 경원대학교 문화콘텐츠기술 연구소, pp.45-61, 2008.
- [12] *Abaqus Keywords manual*, Hibbit, Karsson & Sorensen Inc., Version 6.1, pp.4.20.1-4.20.9, 2000.

황보택근(Taeg-Keun Whangbo) 정회원



- 1995년 : Stevens Institute of Technology 전산학과(박사)
- 1997년 ~ 현재 : 경원대학교 IT 대학 컴퓨터미디어전공 부교수
- <관심분야> : 문화콘텐츠기술, 컴퓨터 그래픽스, 영상처리

저자소개

정재웅(Jaeung Chung)

정회원



- 2000년 : 미국 미시간대 항공공학(박사)
- 2006년 ~ 현재 : 경원대학교 기계자동차공학과 조교수
- <관심분야> : 전산구조해석, 복합재료, 콘텐츠응용